

CIRCUITE DE CONDIȚIONARE A SEMNALELOR

Autor: Conf.dr.ing. Constantin Harja

II.5. CIRCUITE DE FILTRARE ANALOGICĂ

II.5.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Filtrarea analogică este operația prin care se modifică banda de frecvență a unui semnal cu ajutorul unor circuite numite *filtre analogice*. Un filtru analogic poate fi privit ca un cuadripol cu funcția de transfer dependentă de frecvență într-o manieră particulară, conform Fig.II.31, Fig.II.32.

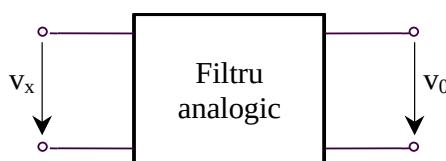


Fig.II.31. Reprezentarea unui filtru analogic sub formă de cuadripol.

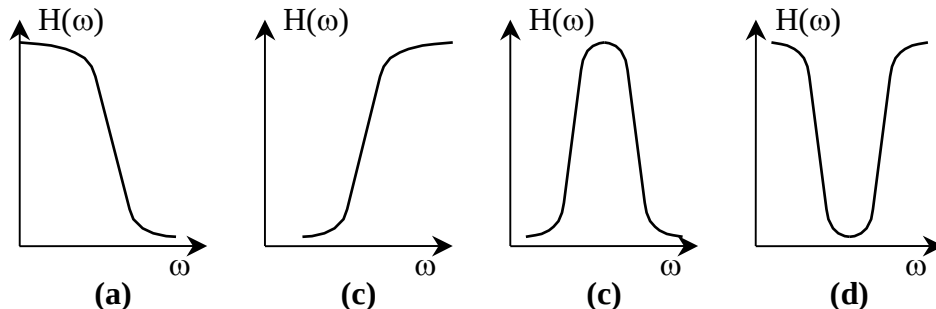


Fig.II.32. Categoriile de filtre analogice:

(a) – trece-jos; (b) – trece-sus; (c) – trece-bandă; (d) – oprește-bandă.

În domeniul frecvenței funcția de transfer este dată de *caracteristica de frecvență complexă*:

$$H(j\omega) = \frac{V_0(j\omega)}{V_x(j\omega)} = H(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (\text{II.88})$$

unde $H(\omega)$ reprezintă *caracteristica de amplitudine în funcție de frecvență*, iar $\varphi(\omega)$ – *caracteristica de fază în funcție de frecvență*. Reprezentarea grafică a acestor două tipuri de caracteristici constituie *diagramele Bode*.

În funcție de efectul pe care îl au asupra benzii de frecvență a semnalului util, există patru categorii de filtre analogice, conform Fig.II.32.

În cadrul SAPD filtrarea analogică este necesară în mai multe scopuri, cele mai uzuale exemple fiind următoarele:

- *filtrare trece-jos* – pentru rejecția perturbațiilor suprapuse peste semnalul util sau limitarea benzii semnalului la o valoare determinată, în vederea operației de eșantionare-memorare, numită și *filtrarea anti-aliasing*;
- *filtrare trece-sus* – pentru blocarea componentei continue sau eliminarea unor componente de joasă frecvență;
- *filtrare trece-bandă* – pentru amplificare selectivă sau demultiplexarea semnalelor multiplexate

în frecvență;

- *filtrare oprește-bandă* – pentru blocare unor componente perturbatoare, cum ar fi de exemplu cele provenite din rețeaua de c.a. (multiplu de 50 Hz);

Filtrele analogice se pot realiza în general cu rețele RC , LC sau LC . În domeniul de frecvență specific *SAPD* se utilizează numai filtre cu rețele RC , deoarece bobinele ar necesita miez, rezultând gabaritice și incomod de utilizat.

Filtrele analogice pot fi pasive, incluzând numai rețele RC sau active la care rețelele RC sunt introduse în rețeaua de reacție a unor AO. Evident, filtrele active deși prezintă și unele dezavantaje comparativ cu cele pasive, pe ansamblu predominând avantajele, cu unele excepții, sunt preferate în majoritatea aplicațiilor.

Teoria filtrelor active fiind complexă și voluminoasă, este imposibil de tratat complet în acest context. Pe de altă parte, în cadrul *SAPD* cea mai frecventă utilizare o au filtrele trece-jos. Din aceste motive, în cele ce urmează se va face doar o scurtă introducere în domeniul filtrelor active trece-jos, având în vedere și faptul că aceasta poate servi ca punct de plecare pentru abordarea celorlalte categorii de filtre active.

II.5.2. FILTRE ACTIVE TRECE-JOS

II.5.2.1. Frecvențe caracteristice unui filtru trece-jos (FTJ)

Caracteristica amplitudine-frecvență a unui FTJ este reprezentată în *Fig.II.33*, unde s-a considerat un filtru cu câștig unitar în banda de trecere. Se observă că se pot delimita trei benzi de frecvență caracteristice unui filtru real:

- *banda de trecere* – cuprinsă între $\omega = 0$ și pulsația de tăiere la 3 dB, ω_0 , reprezintă banda utilă a filtrului, unde câștigul este aproximativ constant;
- *banda de tranziție* – cuprinsă între ω_0 și pulsația ω_α corespunzătoare atenuării maxime în banda de tranziție, unde câștigul scade cu un multiplu de 20 dB/decadă, în funcție de ordinul filtrului;
- *banda interzisă* – cuprinsă între ω_α și infinit, unde câștigul tinde la zero.

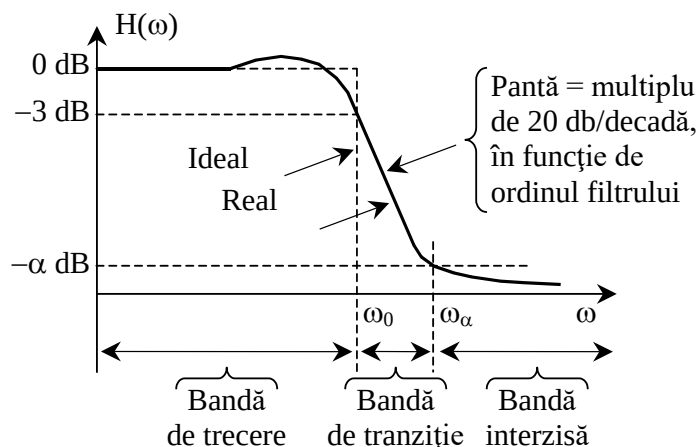


Fig.II.33. Caracteristica amplitudine-frecvență a unui filtru trece-jos.

Din *Fig.II.33* se poate observa că comportarea unui filtru real se apropie cu atât mai mult de cea a un filtru ideal, cu cât este de ordin mai mare (are un număr mai mare de poli), deci panta este

mai abruptă, iar atenuarea în banda de tranziție este mai mică.

Prin filtrare se produce o alterare a spectrului semnalului util, care poate fi exprimată sub forma unei erori. În aplicațiile practice filtrele se proiectează având în vedere un compromis optim între complexitate (număr de poli) și eroarea introdusă asupra semnalului util ca urmare a filtrării.

II.5.2.2. Filtre active trece-jos de ordinul întâi

Filtrele active trece-jos de ordinul întâi sunt constituite dintr-un filtru pasiv, RC, asociat cu un AO în regim de amplificator neinversor sau inversor, conform Fig.II.34.

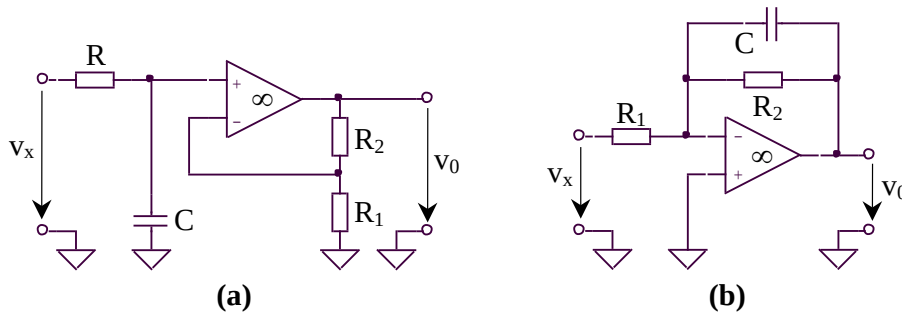


Fig.II.34. Filtre active trece-jos de ordinul întâi:
(a) – cu amplificator neinversor; (b) – cu amplificator inversor.

Expresia funcției de transfer are următoarea formă:

$$(a) \quad H(j\omega) = \frac{V_o}{V_x} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j\omega RC} = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}; \quad (II.89)$$

$$(b) \quad H(j\omega) = \frac{V_o}{V_x} = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j\omega R_2 C} = H(\omega) e^{j\varphi(\omega)}; \quad (II.90)$$

de unde se pot determina caracteristicile amplitudine funcție de frecvență și fază funcție de frecvență și frecvența de tăiere la 3 dB, ω_0 :

$$(a) \quad H(\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad \varphi = -\arctg(\omega RC); \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}; \quad (II.91)$$

$$(b) \quad H(\omega) = \left(\frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_2 C)^2}}; \quad \varphi = -\arctg(\omega R_2 C); \quad \omega_0 = \frac{1}{R_2 C}. \quad (II.92)$$

II.5.2.3. Filtre active trece-jos de ordinul doi

Filtrele active trece-jos de ordinul 2 sunt constituite dintr-o rețea RC și un AO, într-o structură cu reacții multiple. Pentru ca filtrul să fie de ordinul 2 (să prezinte 2 poli) rețeaua RC trebuie să conțină 2 condensatoare. De regulă se utilizează structuri universale pe baza cărora, prin alegerea adecvată a naturii impedanțelor din structura lor se pot obține filtre trece-jos, trece-sus și trece bandă. Pentru filtrele trece-jos de ordinul 2 schema tipică, necesitînd un număr minim de componente, o constituie filtrul *Sallen and Key*, reprezentat în Fig.II.35. Repetorul poate fi înlocuit cu un amplificator neinversor obținut prin conectarea intrării inversoare la o rețea de reacție (R_1 , R_2 , Fig.II.34).

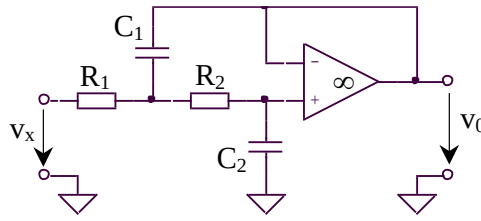


Fig.II.35. Filtrare active trece-jos de ordinul doi, tip Sallen and Key.

Filtrele trece-jos de ordinul 2 respectă teoria generală a sistemelor de ordinul 2. Pentru proiectare se pleacă de la expresia funcției de transfer:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{R_1 C_2} s + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2}, \quad (\text{II.93})$$

unde ω_0 este frecvența de tăiere la 3 dB și Q – factorul de calitate/selectivitate conform expresiilor:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad \text{și} \quad Q = \omega_0 R_1 C_2 = \sqrt{\frac{R_1 C_2}{R_2 C_1}}. \quad (\text{II.94})$$

Pentru ca funcția de transfer să prezinte rădăcini valide, se impune condiția:

$$\frac{C_1}{C_2} \geq 4Q. \quad (\text{II.95})$$

Valorile optime sunt: $R_1 = R_2$, rezultă $C_1 = 2QC$ și $C_2 = C/2Q$, pentru $Q < 10$.

II.5.2.4. Filtrare active trece-jos de ordin superior

Filtrele active trece-jos de ordin mai mare decât 2 se realizează conectând în cascadă celule de filtrare de ordinul întâi și 2. Astfel, filtrele de ordin impar vor fi constituite dintr-o celulă de ordinul întâi și mai multe celule de ordinul 2, iar cele de ordin par numai din celule de ordinul 2.

Există mai multe tipuri de filtre de ordin superior clasificate și denumite după tipul polinoamelor care descriu funcția de transfer, cum ar fi: filtre *Butterworth*, Thomson (Bessel), Chebyshev, eliptice (Cauer).

De exemplu, pentru filtrele active trece-jos *Butterworth* forma generală a funcției de transfer este următoarea:

$$H(s) = \frac{V_0}{V_x} = \frac{1}{B_n(s)}, \quad (\text{II.96})$$

unde $B_n(s)$ este polinomul *Butterworth* de ordinul n , având expresia:

$$B(s) = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \dots + a_1s + 1. \quad (\text{II.97})$$

În funcție de paritatea ordinului filtrului, acest polinom poate fi descompus în factori primi de ordinul întâi și doi, astfel:

$$B_n(s) \begin{cases} (s+1)(s^2+b_1s+1)(s^2+b_2s+1) \dots \text{până la } \frac{n+1}{2} \text{ pentru } n \text{ impar;} \\ (s^2+b_1s+1)(s^2+b_2s+1) \dots \text{până la } \frac{n}{2} \text{ pentru } n \text{ par;} \end{cases} \quad (\text{II.98})$$

Factorii primi de ordinul întâi sau doi corespund celulelor de filtrare de ordinul respectiv din structura filtrului. Coeficienții $b_1, b_2 \dots$ sunt cunoscuți ca valoare numerică și în funcție de aceștia

se calculează componentele RC .

Răspunsul în frecvență este definit prin modulul funcției de transfer:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^{2n}}}, \quad (\text{II.99})$$

unde ω_0 reprezintă frecvența de tăiere.

Ca toate celelalte circuite electronice și filtrele active sunt disponibile și sub formă de circuit integrat, inclusiv ca filtre universale, până la ordinul 8. Parametrii funcționali pot fi prescriși în diferite moduri (prin conexiuni, componente exterioare sau frecvență de tact pentru cele cu capacități comutate) pe baza unor relații de calcul date în catalog sau pot fi programați prin software de către un sistem de calcul cu microprocesor.